不同物候时期华西雨屏区四个树种新鲜凋落物可提取腐殖质碳动态

温娅檬[1]，余胜[2]，游成铭[1]，王旭熙[3]，袁吉[1]，曾合州[1]，黄美玉[1]，吴福忠[1]*

（1. 四川农业大学 生态林业研究所，长江上游林业生态工程四川省重点实验室　成都　611130；

2. 四川省乐山市市中区林业局，四川 乐山 614000；

3. 西华师范大学 国土资源学院　四川 南充　637009）

摘　要：凋落物的可提取腐殖质碳可随着植物生长节律及物候时期的变化而变化，并进而影响物质循环的过程。认识可提取腐殖质碳的含量在物候期的变化对于深入了解以凋落物为载体的生态系统物质循环特征具有重要意义，但缺乏关注。因此，以华西雨屏区麻栎(*Quercus acutissima*)、楠木(*Phoebe zhennan*)、柳杉(*Cryptomeria fortune)*和喜树(*Camptotheca acuminate)*为研究对象，通过定点动态收集萌芽期、展叶期、盛叶期和落叶期的不同类型凋落物，分析其可提取腐殖质全碳(Extractable humus carbon, HC)、胡敏酸碳(Humic acid carbon, HAC)、富里酸碳(Fulvic acid carbon, FAC)以及胡敏酸碳/富里酸碳(Humic acid carbon/Fulvic acid carbon, HAC/FAC)的差异。结果显示：相对于其他凋落器官，在同一物候时期凋落叶中的 HC 和 HAC 含量都最高，大致都表现为凋落叶＞凋落枝＞凋落果，且在落叶树种中更为显著；相对于其他时期，展叶期 4 个树种凋落叶均表现出较高的 FAC 含量，但不同物候期凋落枝和凋落果的 HAC 含量以及 FAC 含量受物种的影响较大。尽管 HAC/FAC 在各器官间差异并不显著，但是落叶树种相同器官的 HAC/FAC 低于常绿树种，表明落叶树种凋落物富里酸相对含量较高，形成速度相对较快，难降解程度也相对较大。统计分析表明，关键时期、物种类型、器官类型及其相互作用对凋落物中 HC、HAC、FAC 含量和 HAC/FAC 均具有不同程度的影响，这些结果为进一步深入认识区域生态系统以凋落物为载体的物质循环过程提供了理论依据及新的思路。

关键词：华西雨屏区，乡土树种，凋落器官，叶片物候期，可提取腐殖质碳

中图分类号：Q946　　　　文献标识码：A

DOI：10.11931/guihaia.gxzw201805043

The dynamics patterns of extractable humic carbon from newly-shed litter of four tree species at different phenological stages in the Rainy Area of West China

WEN Yameng[1], YU Sheng[2], YOU Chengming[1], WANG Xuxi[3], YUAN Ji[1], ZENG Hezhou[1], HUANG Meiyu[1], WU Fuzhong[1]*

([1]*Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Provinve, Institute of Ecology and Forestry, Sichuan Agricultural University*, Chengdu，611130, Sichuan, China

[2]*Leshan City Central Forestry Bureau*, Leshan 614000, Sichuan, China

[3]*Land and Resources College, China West Normal University*, Nanchong 637009, Sichuan, China)

收稿日期：2018-05-21

项目基金：国家重点研发计划(2017YFC0505003)；国家自然科学基金(31670526，31622018)；四川省青年科技创新团队(2017TD0022)和四川农业大学科研兴趣项目(2018169)[Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFC0505003), the National Natural Science Foundation of China (31670526, 31622018), Sichuan Provincial Science and Technology Project for Youth Innovation Team (2017TD0022), and Sichuan Agricultural University Research Interest Project（2018169)]。

作者介绍：温娅檬(1995-)，女，四川成都人，硕士研究生，主要从事林业生态研究，(E-mail) 554707138@qq.com。

*通讯作者：吴福忠，教授，博士生导师，主要从事森林生态学研究，(E-mail) wufzchina@163.com。

Abstract: The extractable humus carbon of the litter can change with the rhythm of the plant growth and the phenological period, and then affect the material circulation process. Understanding of the changes in the extractable humic carbon content during the phenological period are of great significance for the in-depth understanding of the features of the litterfall-supported regional ecosystem cycle, but they lack attention. Therefore, *Quercus acutissima*, *Phoebe zhennan*, *Cryptomeria fortune*, and *Camptotheca acuminatain* were selected in the Rainy Area of West China. The different types of litters in the leaf budding period, leaf expanding period, leaf maturing period, and leaf falling period were dynamically collected through fixed-point analysis of the differences in the extractable humic carbon (HC) humic acid carbon (HAC), fulvic acid carbon (FAC), and humic acid carbon/fulvic acid carbon (HAC/FAC). The results show: that the contents of HC and HAC in leaf litter were the highest in the same critical period, and they all showed as leaf litter> twig litter> fruit litter, and showed that the evergreen tree species was not significant but the deciduous tree species was significant; Compared with other periods, leaf litter of the four tree species exhibited high FAC content during the leaf expanding period, However, HAC content and FAC content of twig litter and fruit litter in phenological stages are greatly affected by species. Humic acid carbon/Fulvic acid carbon (HAC/FAC) in leaf litter of four tree species to characterize the relative content and formation rate of humic acid, fulvic acid during the humification of leaf litter, there was no significant difference between organs, showing that the deciduous tree species had lower HAC/FAC than evergreen tree species. The present study shows that stage types, species types, organ types and their interactions have different degrees of influence on HC, HAC, FAC content and HAC/FAC in litter. The results provide a theoretical basis and a new direction for further understanding the material circulation process of litterfall in the regional ecosystem.

Keywords: Rainy Area of West China, native tree species, fallen organ, pheonogical stages, extractable humus carbon

森林凋落物是指森林生态系统中植物在生长发育的过程中所产生的新陈代谢产物，归还到林地表面，作为分解者的物质和能量来源，从而维持生态系统功能持续稳定的所有有机物质的总称(Berg & McClaugherty，2014)。凋落物不仅是维持营养物质循环的主要承担者，而且还在森林生态系统的养分平衡中起着重要的作用(Ponge，2013；Abakumov et al，2013)，并且是土壤有机质的主要来源，对于森林土壤碳吸存和维持土壤肥力也起着有关键作用。一般认为，由胡敏酸、富里酸和胡敏素组成的腐殖质占土壤有机质的 60 ~ 90%(Ponge，2013；Abakumov et al，2013)。传统的认识认为凋落物分解的最后阶段才是腐殖质的形成过程，但越来越多的研究结果发现新鲜凋落物中也存在大量的腐殖质物质，并可对凋落物腐解化过程中腐殖质的积累和土壤有机质的形成产生明显的贡献。腐殖质不仅是森林生态系统中养分和碳的主要载体，也是土壤形成的主要途径(Berg & McClaugherty，2014；Ponge，2013)。新鲜凋落物中所存在的可提取腐殖质碳(Adani et al，2007)主要是由胡敏酸、富里酸和胡敏素组成(Ponge，2013；Abakumov et al，2013)。由于腐殖质中胡敏酸、富里酸为主的成分较高，且胡敏酸最为活跃，因此，研究多以胡敏酸、富里酸为主；胡敏素由于分离纯化难度高，难以检测，所以对它的研究相对较少(窦森等，2010)。然而，植物生长与物候节律往往导致不同物候时期新鲜凋落物质量和类型均具有较大的差异。比如，秋末冬初落叶期是凋落叶的集中生产期(葛晓敏等，2017；王文君等，2013)，而春季萌芽期和展叶期凋落枝相对较多，夏季盛叶期花果繁殖器官凋落较多。并且，不同物种凋落节律也往往具有各自的特点。物种类型、凋落器官类型、物候节律等均可改变凋落物的腐殖质特征，进而影响凋落物形成土壤有机质的过程，但相关规律并不清晰，亟待关注。

位于四川西部地区的华西雨屏区，是以潮湿气候为主的特殊气候地理单元，也是一个复合性、大尺度的生态过渡带(Zhou et al，2017)。由于特殊的地形和气候，该地区降雨量充沛，

各种树木生长发育状态良好，形成了独具特色的亚热带常绿阔叶林。以该地区具有代表性的优势树种楠木(*Phoebe zhennan*)、柳杉(*Cryptomeria fortune*)、喜树(*Camptotheca Acuminata*)和麻栎(*Quercus acutissima*)为研究对象，在不同物候关键时(萌芽期、展叶期、盛叶期、落叶期)分析不同植物器官(枝、叶、果)凋落物可提取腐殖质碳、胡敏酸碳和富里酸碳等的动态变化特征，以期为深入了解区域凋落物的归还特点以及森林生态系统的土壤有机质形成提供基础数据。

1. 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省都江堰市灵岩山，四川农业大学教学实习基地，华西雨屏区生态环境定位监测站(103°34′—103°36′E，31°01′—31°1′N)，本区属亚热带温湿气候，地处四川盆地西缘山地，是从青藏高原向成都平原过渡的地带。20 世纪 50 年代，当初的四川大学森林系在本区栽植了多种人工混交林，研究样地选自 1 009 m 处的以楠木为主的人工混交林(乔木优势种为楠木、喜树、柳杉，其混交比例约为 5:3:2，平均树高约 24 m，平均胸径约 32.03 cm，郁闭度约 0.70)。该区域年平均气温为 12.5 ~ 15.2 ℃，最高气温 24.7 ℃(7 月)，最低气温 4.6 ℃(1 月)。该地区的降水量较大，雨量充沛，多年平均降水量 1 243.0 mm，土壤类型为发育在砂岩上的黄壤。四川农业大学都江堰灵岩山林学教学实习基地形成了由不同优势乔木树种群落组成的混交人工林，如：以楠木为主的混交人工林，麻栎为主的混交人工林，峨嵋含笑为主的混交人工林等，从而该地区森林的乔木层主要优势种有楠木(*Phoebe zhennan*)、喜树(*Camptotheca Acuminata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、峨嵋含笑(*Michelia wilsonii*)等，并且大部分树种的林龄约 65a(马志良等，2017；陈昌笃，2000)。

1.2 样地设置与样品采集

凋落物的收集采用漏斗式收集法(董鸣，1997)。在样地内设置了 3 个样方，每个样方面积大小均为 15 m × 15 m(每个样方内均包括其相应的优势乔木树种)。每个样方的各优势树种冠层交汇处下方，放置 3 个上端收集口直径为 1 m，下端开口为 0.15 m，高度为 0.6 m 的凋落物收集器。收集器用 3 根长度为 1.8 m 的木条水平固定，使其最低点距地面大约 0.4 m，框内底部用孔径大小为 1 mm 的黑色尼龙袋收集乔木的凋落物(Fu et al，2017)。

2016 年 11 月—2017 年 11 月进行凋落物收集，选择了样地内 4 种优势乔木，包括常绿阔叶树种楠木、常绿针叶树种柳杉、以及落叶阔叶树种喜树和麻栎。根据前期对样地植被和温度的调查，结合了当地优势物种的物候特征，得出每年 11—12 月该地区凋落物量较高，所以该时间段每半月采集一次凋落物样品，其他月份每月底将各样地收集器采集到的凋落物带回实验室进行分样。根据当地气温温度和植物的物候特征，将该区域自然年植物的生长节律大致划分为萌芽期(2、3 月)、展叶期(4、5、6 月)、盛叶期(7、8、9、10 月)、落叶期(11、12、次年 1 月)四个关键时期。每次采样后将各收集器中的凋落物全部带回实验室，自然风干。按照每个物种的凋落物组分(叶、枝、果等)和其他难以区分的植物残体进行分类。放入编号信封中，然后放置烘箱，在 65 ℃ 恒温烘干至恒重，粉碎，过筛，用于测定各个指标。

1.3 样品分析方法

由于胡敏酸和富里酸是可提取腐殖质的主要成分，而难提取的胡敏素由于分离纯化难度高且难以检测，因此已有研究多以胡敏酸和富里酸为主(窦森等，2010)。胡敏酸和富里酸的提取和分离参考《中华人民共和国林业行业标准 LY / T 1238－1999》。称取风干样品 0. 5 g 于 150 mL 锥形瓶，加 100 mL 0. 1 mol L^{-1} NaOH 和 0. 1 mol L^{-1} $Na_4P_2O_7 \cdot 10\ H_2O$ 混合提取液，加塞振荡 10 min，沸水浴 1 h，待冷却后过滤，再过 0. 45 μm 滤膜，滤液为浸提液，测定腐殖质全碳含量(Humus carbon，HC)。取浸提液 20 mL 于试管，80℃水浴 30 min，逐滴加 0. 5

mol L^{-1} H_2SO_4 至 pH 2(絮状沉淀)，过夜。用 0. 05 mol L^{-1} H_2SO_4 洗涤，过滤，沉淀即为胡敏酸。用热的 0. 05 mol L^{-1} NaOH 少量多次洗涤沉淀，过滤至 100 mL 容量瓶，定容，取溶解的胡敏酸溶液过 0. 45 μm 滤膜，测定胡敏酸碳含量(Humic acid carbon，HAC)。腐殖质全碳、胡敏酸碳含量采用 TOC(multi N/C 2100，Analytic jena，德国)测定。

富里酸碳(Fulvic acid carbon，FAC) = 腐殖质全碳－胡敏酸碳。

1.4 数据分析

用重复测量方差分析检验时间、物种、器官和时间与物种、时间与器官、物种与器官和时间与物种与器官的交互效应对可提取腐殖质碳，胡敏酸碳，富里酸碳和胡敏酸碳/富里酸碳的影响；用单因素方差分析检验各物种之间、各物种与各器官之间在各季度的差异显著性。显著性水平设为 P =0. 05。采用 SPSS 17. 0 和 Excel 2010 进行数据统计分析和绘图。用单因素方差分析法(one - way ANOVA)和最小差异显著法(LSD)比较物种类型、器官类型和关键时期对凋落物三种碳的含量以及 HAC/FAC 的影响；采用多变量方差分析法(GLM multivariate)和最小差异显著法(LSD)比较物种、器官和时期及其相互作用对凋落物可提取腐殖质碳、胡敏酸碳和富里酸碳的含量以及胡敏酸碳/富里酸碳的影响。显著性水平设为 P = 0. 05。数值以平均值 ±标准误(mean ±SE)表示。

2. 结果与分析

2.1 可提取腐殖质全碳含量的动态变化

物种类型、器官类型、关键时期及其相互作用均对凋落物中的腐殖质全碳(HC)的含量具有显著影响(表 1)。受物候期的影响，不同物种凋落物中的 HC 表现出显著变化(图 1)。各物种凋落叶的 HC 含量呈现出从萌芽期开始上升，在盛叶期达到最大值后开始下降。凋落枝表现为从展叶期开始下降，并达到最小值，然后开始上升。除麻栎和喜树的萌芽期外，在同一关键时期，凋落叶中的 HC 含量高于其他器官，表现为凋落叶＞凋落枝＞凋落果(图 1)。常绿树种(楠木、柳杉)中 HC 含量在器官和关键时期间的差异都不显著，而落叶树种(麻栎、喜树)中 HC 含量在器官和关键时期间的差异显著。

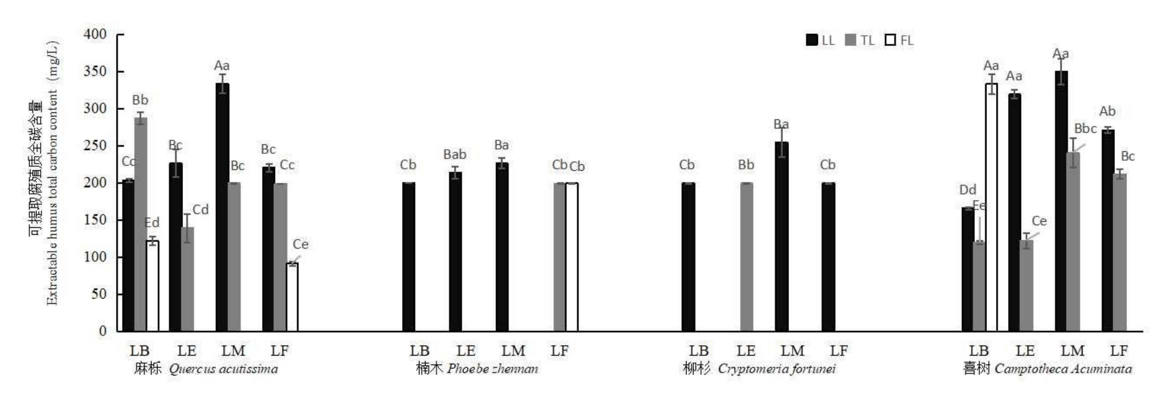
表 1 物种、器官、时期及其交互作用对凋落物可提取腐殖质碳含量的重复测量方差分析

Table 1 ANOVA of repeated measures of species, organ, period, and their interactions on the carbon content of extractable humus from litterfall.

变量 Variable	S	O	T	S ×T	S ×O	O ×T	S ×O ×T
F_{HC}	41.690**	73.768**	24.335**	22.500**	98.491**	33.138**	15.477**
F_{HAC}	7.912**	64.582**	24.515**	6.769**	19.690**	7.839**	4.925*
F_{FAC}	54.697**	15.525**	9.050**	19.044**	37.640**	27.562**	11.246**
$F_{HAC/FAC}$	6.972**	0.191	12.971**	15.313**	0.057	0.087	0.135

注：S.物种类型；O.器官类型；T.关键时期。$F_{HC.}$腐殖质全碳含量；$F_{HAC.}$胡敏酸碳含量；$F_{FAC.}$富里酸碳含量；$F_{HAC/FAC.}$胡敏酸碳含量/富里酸碳含量。*：P ≤ 0.05；**：P ≤0.01。

Note: S. Species type; O. Organ type; T. Stage type. $F_{HC.}$ Humus carbon content; $F_{HAC.}$ Humic acid carbon content; $F_{FAC.}$ Fulvic acid carbon; $F_{HAC/FAC.}$ Humic acid carbon content/Fulvic acid carbon. *: P ≤ 0.05;**: P ≤0.01.



注：LB.萌芽期；LE.展叶期；LM.盛叶期；LF.落叶期。LL.凋落叶；TL.凋落枝；FL.凋落果。不同大写字母表示同一时期不同器官间差异显著($P \le 0.05$)，不同小写字母表示同一器官不同时期间差异显著($P \le 0.05$)，同下。

Note: LB. Leaf budding period; LE. Leaf expanding period; LM. Leaf maturing period; LF. Leaf falling period. LL. Leaf litter; TL. Twig litter; FL. Fruit litter. Different capital letters within the same stage indicate significant differences between plant organs at 0.05 level, while different lowercase letters within the same organ indicate significant differences among different stages at 0.05 level.

图 1 不同关键时期不同器官凋落物可提取腐殖质全碳的含量(平均值±标准偏差，n =3)

Fig 1 The relative contents of extractable humus carbon in different litter organs during different critical periods (mean ± SD, n =3).

2. 2 胡敏酸碳和富里酸碳的动态变化

物种类型、器官类型、关键时期及其相互作用均对凋落物中的胡敏酸碳(HAC)以及富里酸碳(FAC)的含量具有显著影响(表 1)。其中除柳杉凋落叶的 HAC 呈现出一直上升的趋势外，其余三个物种凋落叶的 HAC 含量都呈现出从萌芽期开始下降，并在盛叶期上升，且达到最大值；而四个物种凋落叶的 FAC 含量都呈现出从萌芽期开始上升，并在展叶期达到最大值后，开始下降(图 2)。在同一关键时期，除喜树萌芽期 HAC 含量表现为凋落叶＞凋落果＞凋落枝外，其余三个物种都表现为凋落叶＞凋落枝＞凋落果。并且除喜树凋落物中 HAC 的含量在各关键时期的差异不显著，在器官间的差异显著外，其余三个物种的差异显著。而各器官凋落物中 FAC 含量表现出较复杂的变化趋势(图 2)。其中，常绿树种(楠木、柳杉)凋落物中 FAC 含量在各器官间总体表现为不显著差异，而落叶树种(麻栎、喜树)凋落物中 FAC 含量在各器官间总体表现为显著差异。

2. 3 胡敏酸碳/富里酸碳的动态变化

物种类型、器官类型、关键时期三个影响因素中仅物种、时期及物种和时期的相互作用对 HAC/FAC 有显著影响(表 1)。同一器官凋落物中，凋落枝、凋落果 HAC/FAC 表现出上升的趋势，柳杉凋落叶呈现出直线下降的趋势。麻栎和喜树凋落叶表现呈现出从萌芽期开始上升，并在盛叶期开始下降的趋势，而楠木凋落叶则呈现出从萌芽期开始下降，并在展叶期达到最小值后又上升的趋势(图 3)。其中，麻栎凋落叶 HAC/FAC 表现为盛叶期出现最大值且差异不显著，而凋落枝则表现为落叶期＞盛叶期＞展叶期＞萌芽期且差异显著；楠木凋落叶的 HAC/FAC 为萌芽期＞盛叶期＞展叶期且差异明显；柳杉凋落叶的 HAC/FAC 为萌芽期＞盛叶期＞落叶期且差异显著；喜树凋落叶的 HAC/FAC 最大值出现在展叶期且差异不显著，而凋落枝者表现为盛叶期＞落叶期＞展叶期＞萌芽期且差异显著。

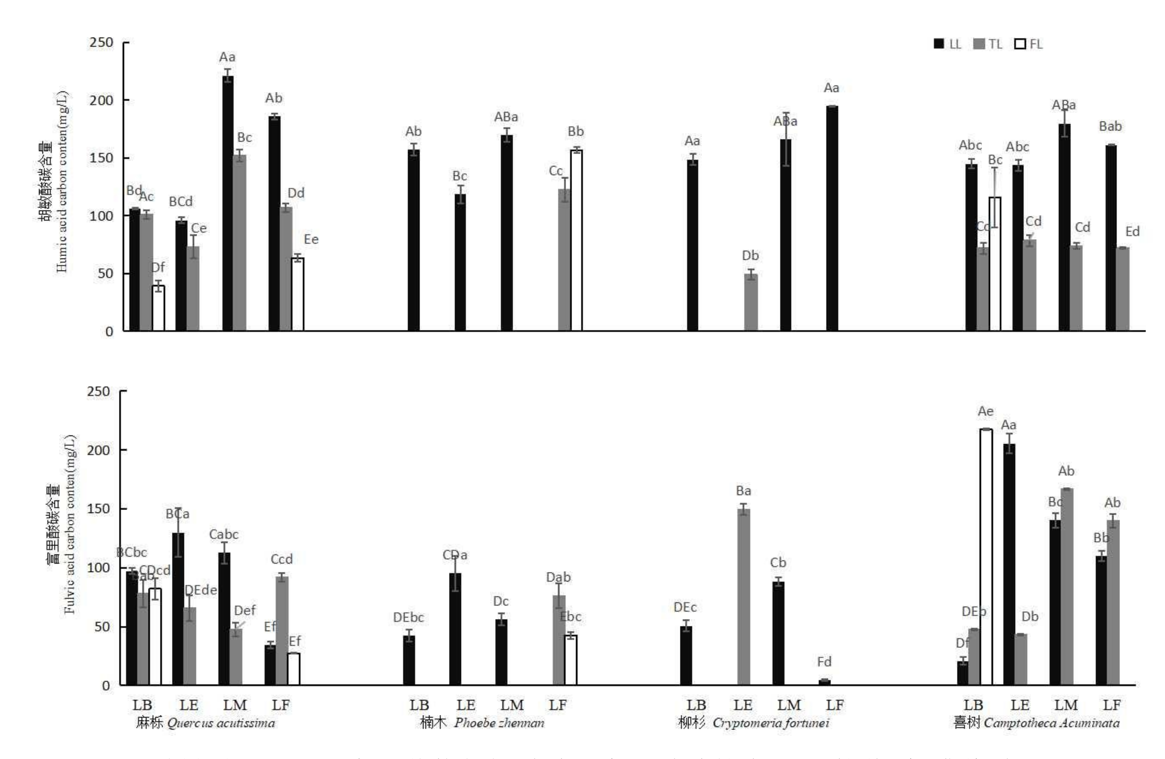


图 2 不同关键时期不同器官凋落物胡敏酸碳和富里酸碳的含量(平均值±标准偏差，*n* =3)

Fig 2 The relative contents of extractable humic acid carbon and fulvic acid carbon content in different litter organs during different critical periods(mean ± SD, *n* =3)

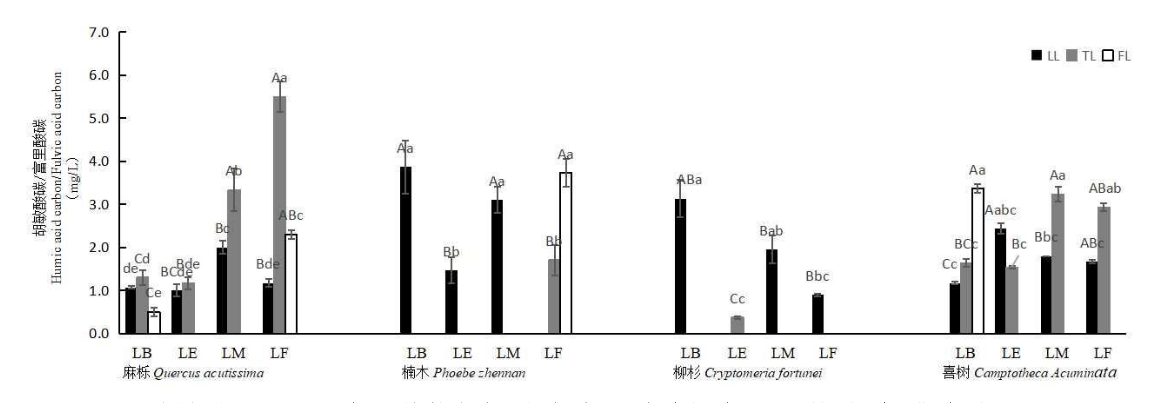


图 3 不同关键时期不同器官凋落物胡敏酸碳/富里酸碳的含量(平均值±标准偏差，*n* =3)

Fig 3 The relative contents of extractable humic acid carbon/fulvic acid carbon content in different litter organs during different critical periods(mean ± SD, *n* =3)

3. 结论与讨论

凋落物的季节动态不仅依赖于群落组成树种的生物学特性和生态学特性，还同气候条件等密切相关(林波等，2004)。不同气候区地表植被、温度、降水对土壤有机质含量影响较大(孙凡等，2017)。在每年凋落物的养分输入中，叶落通常占 75 ~ 85%，而枝落(包括花和果)则为 15 ~ 25%(Klinge et al，1968)。结果表明，在盛叶期新鲜凋落物中所检测到的 HC 最为丰富(Ni et al，2014)，并且在同一关键时期，凋落叶的 HC 含量是最高的。其主要原因是由于该季度降水量较大，风速较大，外界物理因素的使尚未完全老化甚至有些幼嫩的叶片也大量脱落，同时也和植物生长适应环境条件有关，当冬季来临之前，叶片、枝条、根系等器官为了度过冬季的低温环境，老叶中的养分会迅速向当年生的幼嫩组织中转移，把大量的可溶

性糖储存起来(石贵玉等，2016)，以此来提高新生细胞的细胞液浓度，可以更好的增加其抗寒能力(马志贵和王金锡，1993)。这一发现表明，腐殖物质在组分掉落之就已经储存在植物体内了，并且促进了土壤的形成和向土壤的自肥(Ni et al，2015；Cotrufo et al，2013)。而常绿树种(楠木、柳杉)HC 含量在各器官类型和关键时期间的差异并不显著，而落叶树种(麻栎、楠木)HC 含量在各器官类型和关键时期间差异显著。可提取腐殖质碳在不同器官中的分配，基本上与各器官的生物量成正比例(方晰等，2006)。研究表明了可提取的 HC 的含量，在同一关键时期，表现为凋落叶＞凋落枝＞凋落果的顺序。

因为落叶阔叶树种的贡献主要在夏末和初秋(Gosz et al，1973；Meier et al，2006)，阔叶树种(麻栎、楠木和喜树)的凋落叶 HAC 含量都呈现出从萌芽期开始下降，并在盛叶期上升达到了最高值后下降的趋势。这可能是由于高温引起的植物含水量过低，从而导致了叶片气孔关闭，限制了 CO_2 进入叶片，使植物呼作用加强，产生的 O_2 有利于胡敏酸的形成(Dou et al，2007)。相反，低 CO_2 和高 O_2 会抑制富里酸的积累(Dou et al，2010)，所以凋落叶的 FAC 含量呈现出从萌芽期开始上升，并在展叶期达到最高值后开始下降的趋势，和 HAC 含量的趋势相反。而针叶树种(柳杉)凋落叶 HAC 含量则呈现出一直上升的趋势。这一发现可能是因为针叶树种的叶片面积较小，对气候导致的蒸腾作用反应较弱，因此其储存水分的能力较强(Catovsky et al，2002)。然而森林木质凋落物随机性较大，枝的凋落通常与物候没有直接联系，当月收集到的凋落枝往往是以前枯死于树上的死枝(Gosz et al，1972),所以凋落枝的 HAC 和 FAC 的含量并没有呈现出明显的规律性。

总体而言，凋落枝和凋落果的 HAC/FAC 一直呈现出上升的趋势，而凋落叶 HAC/FAC 的趋势较为复杂。落叶阔叶树种(麻栎、喜树)凋落叶的 HAC/FAC 呈现出从萌芽期开始上升，并在盛叶期开始下降的趋势，常绿阔叶树种(楠木)凋落叶则呈现出从萌芽期开始下降，并在展叶期达到最小值后又上升的趋势，而常绿针叶树种(柳杉)则呈现出一直下降的趋势。在同一关键时期，凋落枝的 HAC/FAC 比值大于凋落叶，表明在凋落枝中胡敏酸的形成速度比富里酸的形成速度快。此外，在萌芽期和展叶期，凋落枝和凋落叶的 HAC/FAC 比率均大于 1，这表明凋落枝和凋落叶都是胡敏酸都形成在富里酸后，HAC 浓度高于 FAC 浓度，这可能是由于降水量增加导致的酸溶性富里酸的损失(Ni et al，2014)。总的来说，落叶树种叶(麻栎、喜树)的 HAC/FAC 小于常绿树种叶(楠木、柳杉)，这说明落叶树种的 HAC 浓度要比常绿树种少，且形成较慢。

综上所述，物种类型、器官类型和物候关键时期显著影响凋落物可提取腐殖质碳，但由于不同物候关键时期植物生长节律和气候条件的差异，使得不同类型凋落物可提取碳含量具有显著的变化，表现为 HC 和 HAC 的含量表现为凋落叶＞凋落枝＞凋落果。同时，HC、HAC 和 FAC 含量在不同物种间表现也具有明显差异，表现为落叶树种 HC 和 HAC 含量高于常绿树种，而 FAC 含量以及 HAC/FAC 低于常绿树种，说明落叶树种凋落物富里酸相对含量较高，形成速度相对较快，难降解程度相对较大，可能对土壤有机质的贡献也更大。这些结果为深入认识区域森林生态系统以凋落物为载体的物质归还特点以及土壤有机质形成过程提供了基础数据和新的思路。

参考文献：

ABAKUMOV EV, AJTHAML T, BRUS J, et al, 2013. Humus accumulation, humification, and humic acid composition in soils of two post-mining chronosequences after coal mining[J]. J Soils Sediments, 13(3):491-500.

ADAIN F, SPAGNOL M, NIEROP KGJ, 2007. Biochemical origin and refractory properties of humic acid extracted from maize plants: the contribution of lignin[J]. Biogeochemistry, 82(1):55-65.

BERG B, MCCLAUGHERTY C. Plant Litter. Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration[M]. 2008.

CATOVSKY S, HOLBROOK NM, BAZZAZ FA, 2002. Coupling whole-tree transpiration and canopy photosynthesis in coniferous and broad-leaved tree species[J]. Can J Forest Res, 32(2):295-309.

COTRUFO MF, WALLENSTEIN MD, BOOT CM, et al, 2013. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?[J]. Global Change Biol, 19(4):988-995.

CHEN CD, 2000. The Du jiangyan Region--Pivot sector of assemblage, differentiation and maintenance of biodiversity in northern part of Hengduan Mountain[J]. Acta Ecol Sin, 20(1):28-34. [陈昌笃, 2000. 都江堰地区--横断山北段生物多样性交汇、分化和存留的枢纽地段[J]. 生态学报, 2000, 20(1):28-34.]

DOU S, Yu SQ, ZHANG JJ, 2007. Effects of carbon dioxide concentration on humic substances formation in corn stalk decomposition[J]. Acta Pedol Sin. 44(3):458-466. [窦森, 于水强, 张晋京, 2007. 不同 CO2 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. 土壤学报, 44(3):458-466.]

DOU S, Tardy Y, ZHANG JJ, et al, 2010. The rmodynamic stability of humic acid and fulvic acid in soil and its driving factors[J]. Acta Pedol Sin, 47(1):71-75. [窦森, Yves Tardy, 张晋京,等，2010. 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究[J]. 土壤学报, 47(1):71-76.]

DONG M, 1997. Survey and Analysis of Terrestrial Biotopes[M]. China Standard Press. [董鸣, 1997. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 中国标准出版社.]

FU C, YANG W, TAN B, Xu Z, 2017. Seasonal dynamics of litterfall in a sub-alpine spruce-fir forest on the eastern Tibetan Plateau: allometric scaling relationships based on one year of observations. Forests. 8(9):314.

FANG X, TIAN DL, 2006. Study on dynamics of C storage and C storage in chinese fir plantation[J]. Guihaia, 26(5):516-522. [方晰，田大伦，2006. 杉木人工林C库与C吸存的动态研究[J]. 广西植物, 26(5)：516-522.]

GOSZ JR, LIKENS GE, BORMANN FH, 1973. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire[J]. Ecol Monogr, 43(2):173–191.

GOSZ JR, LIKENS GE, BORMANN FH, 1972. Nutrient content of litter fall on the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire[J]. Ecology, 53(5):699–78.

GE XM, TANG LZ, WANG RH, et al, 2017. Litterfall biomass and decomposition characteristics in a poplar plantation ecosystem[J]. Ecol Environ, 26(9):1457-1464. [葛晓敏, 唐罗忠, 王瑞华, 等，2017. 杨树人工林生态系统凋落物生物量及其分解特征[J]. 生态环境学报, 26(9):1457-1464.]

KLINGE H, RODRIGUES WA, 1968. Litter production in an area of Amazonian terra firme forest. Part I. Litter-fall, organic carbon and total nitrogen contents of litter[J]. Amazoniana, 1(4):287-302.

LIN B, LIU Q, WU Y, et al, 2004. Research progress in forest litters[J]. Chin J Ecol, 23(1):60-64. [林波, 刘庆, 吴彦, 等, 2004. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 23(1):60-64.]

MEIER CE, STANTURF JA, GARDINER ES, 2006. Litterfall in the hardwood forest of a minor alluvial-floodplain[J]. Forest Ecol Manag, 234(1–3):60–77.

MA Z, YANG WQ, WU FZ, TAN B, 2018. Degradation characteristics of leaf litter polyphenols in subtropical evergreen broad-leaved forest in Sichuan Basin during different rainfall periods[J]. Acta Ecol Sin, 38(9):3078–3085. [马志良, 杨万勤, 吴福忠, 谭波. 四川盆地亚热带常绿阔叶林凋落叶多酚类物质在不同降雨期间的降解特征. 生态学报,38(9):3078–3085.]

MA ZG, WANG JX, 1993. Dynamics of forest litter in the habitat of giant pandas[J]. J Plant Ecol, 17(2):155-163. [马志贵, 王金锡, 1993. 大熊猫栖息环境的森林凋落物动态研究[J]. 植物生态学报, 17(2):155-163.]

NI XY, YANG WQ, XU L, et al, 2014. Effects of winter snowpack on accumulation of humic acid and fulvic acid during humification of foliar litters in an alpine forest[J]. Acta Pedol Sin. 51(5):1138-1152. [倪祥银, 杨万勤, 徐李亚, 等, 2014. 雪被斑块对高山森林凋落叶腐殖化过程中胡敏酸和富里酸累积的影响[J]. 土壤学报, (5):1138-1152.]

NI XY, YANG WQ, TAN B, et al, 2015. Accelerated foliar litter humification in forest gaps: Dual feedbacks of carbon sequestration during winter and the growing season in an alpine forest[J]. Geoderma. 241-242, 136-144.

PONGE JF, 2013. Plant–soil feedbacks mediated by humus forms: A review[J]. Soil Biol Biochem, 57(2):1048-1060.

SUN F, YAN SW, LIN YM, et al, 2017. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and carbon density from damaged vegetation under different climate types in Wenchuan earthquake region[J]. Guihaia, 37(12):1498-1507. [孙凡，严思维，林勇明，等，2017. 汶川震区不同气候区受损植被土壤有机碳储量和碳密度分布特征[J]. 广西植物, 37(12):1498－1507.]

SHI GY, LIANG SC, ZENG XB, et al, 2016. Comparative study on seasonal changes in physiological characteristics of Eucalyptus, broad-leaved and coniferous tree species[J]. Guihaia, 36(7):783-787. [石贵玉，梁士楚，曾小飚，等，2016. 桉树与针叶树、阔叶树生理生化指标季节变化的比较[J]. 广西植物, 36(7):783－787.]

WANG WJ, YANG WQ, TAN B, et al, 2013. The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin[J]. Acta Ecol Sin, 33(18):5737-5750. [王文君，杨万勤，谭波，等，2013. 四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系[J]. 生态学报, 33(18):5737-5750.]

ZHOU SX, HUANG CD, HAN BH, et al, 2017. Simulated nitrogen deposition significantly suppresses the decomposition of forest litter in a natural evergreen broad-leaved forest in the rainy area of western China[J]. Plant Soil. 402(1-2):1-11.